

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 681.51:621.9.048

Р. П. ГАЙДАШ,

Ю. І. КОВАЛЕНКО,

М. П. РУДЬ, канд. техн. наук,

М. О. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, Черкаси, Україна,

В. С. АНТОНЮК, д-р техн. наук, Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ СТІЧКОВИМ ЕЛЕКТРОННИМ ПОТОКОМ ПРИ МІКРООБРОБЦІ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблена методика формування та керування електронно-променевою мікрообробкою елементів пристроїв для адитивного виробництва, в основі якої лежить метод зондування електронного потоку стрічкової форми та наступне дослідження зон термічного впливу на електропровідні та діелектричні поверхнях. Досліджено залежності, що лежать в основі методу керування стрічковим електронним потоком, і які представляють просторово-енергетичні характеристики електронної гармати Пірса від прискорюючої напруги, струму розжарення катоду, відстані від гармати до оброблюваної поверхні.

Ключові слова: електронно-променева мікрообробка, просторово-енергетичні характеристики, зона термічного впливу

Разработана методика формирования и управления электронно-лучевой микрообработкой элементов устройств для аддитивного производства, в основе которой лежит метод зондирования электронного потока ленточной формы и последующее исследование зон термического воздействия на электропроводящей и диэлектрической поверхностях. Исследованы зависимости, лежащие в основе метода управления ленточным электронным потоком, и которые представляют пространственно-энергетические характеристики электронной пушки Пирса от ускоряющего напряжения, тока накала катода, расстояния от пушки к поверхности.

Ключевые слова: электронно-лучевая микрообработка, пространственно-энергетические характеристики, зона термического влияния

The methodology for the formation and operation of electronic and beam microprocessing of device elements for additive production has been developed. The method is based on the method of probing the electronic treat of the ribbon form and further investigation of the zones of thermal action on electrically conductive and dielectric surfaces. The dependencies that underlie the method of controlling the ribbon-based electron treat have been investigated. These dependences represent the spatial and energy characteristics of the Pierce electron gun from the accelerating voltage, the cathode heating current, the distance to the surface.

Keywords: electron-beam microprocessing, spatial-energy characteristics, zone of thermal influence

Актуальність. Концентровані потоки енергії знаходять дедалі ширшого застосування у прецизійних технологіях мікрообробки елементів пристроїв для адитивного виробництва, застосування якого дозволить проводити

розробку вдосконаленої технології та створення на її основі пристроїв 3D-друку. При цьому, перспектива застосування електронного променя в якості інструмента з гнучким керуванням його потужністю, формою та траєкторією зумовлена практичною можливістю ефективно впливати на поверхневий шар матеріалів з різною електропровідністю, у тому числі, на нанорельєф та структуру порушеного шару, які утворилися після різних видів фінішної обробки [1-3].

Фундаментальні дослідження і досягнення вчених В.А. Вашенка, І.В. Зуєва, Г.В. Канашевича, Д.І. Котельникова, І.В. Яценко та інших дослідників значно розширили технологічні можливості електронної мікрообробки різноманітних матеріалів, зменшивши зону обробки до мікрооб'ємів, використавши концентровані електронні потоки стрічкової форми [4, 5].

Спосіб обробки електронами, енергія яких не перевищує 10 кеВ, апробовано для елементів виробів пристроїв адитивного виробництва із діелектриків [6].

Серед переваг даного способу слід відзначити:

- високу гнучкість керування параметрами електронного потоку та сумісність з технологіями мікроелектроніки і інтегральної оптики;
- екологічну чистоту;
- рафінування та спрямоване модифікування поверхневого шару матеріалу за фізичними властивостями та хімічним складом шляхом термоелектричного впливу на поверхневий шар;
- кероване розчинення дефектного шару оптичного скла під локальним впливом температур 1000...1300°C, які створені електронним потоком та утворення при наступному його охолодженні монолітної бездефектної структури поверхневого шару глибиною до 160 мкм і зменшеним нанорельєфом поверхні до значень $R_z = 1,5...3,5$ нм.

Для розширення вже досягнутих технологічних можливостей та подальшого використання даного способу у прецизійній обробці матеріалів з різною електропровідністю (провідників, напівпровідників та діелектриків), однією з головних задач, на рівні з технологічними умовами, постає задача формування та подальшого керування стабільного стрічкового потоку електронів із заданими потужністю та формою розподілу енергії [7, 13-16].

Мета роботи: визначення взаємозв'язку параметрів стрічкового електронного потоку з конструктивними особливостями електронної гармати та формування з перспективою подальшого керування електронної стрічки для ефективного впливу на матеріали, які використовуються в пристроях адитивного виробництва з різною електропровідністю.

Методика досліджень. Експериментальні дослідження проводили на модернізованій вакуумній установці УВН-74, яка містить печі нагріву та охолодження, арматуру для утримання та руху об'єктів обробки, електронно-

променеву гармату Пірса з д्रो́тяним вольфрамовим катодом (діаметр катоду 0,4 мм, довжина дроту 90 мм).

При розжарюванні катод випромінює електрони, які прискорюються електростатичним полем, проходять через щілину аноду (довжина щілини 80 мм, ширина може змінюватися у межах 1...4 мм) і спрямовуються на зразок. Електричні характеристики гармати: струм катоду $I_k = 10...50 \text{ A} \pm 15\%$; діапазон прискорюючих напруг – $U_{прис} = 0...10 \text{ кВ} \pm 2...3\%$; діапазон струму потоку $I_{ном} = 50...400 \text{ мА} \pm 1-5\%$.

Залишковий тиск у вакуумній камері необхідний для роботи гармати становить $p_0 = (3...5) \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. Відстань від електронної гармати до об'єкта обробки може змінюватися у межах $H = 10...60 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Прискорююча напруга до 10 кВ забезпечує енергію електронам, якої достатньо для розігріву поверхні матеріалу у вакуумі до температур 800...1500°C.

У якості матеріалу обробки використано пластини із технічного кремнію Кр0 товщиною 2 мм, пластини товщиною 2 мм зі сталі 12Х18Н10Т та сітка зі сталі Х18Н10Т (крок комірки 60 мкм, діаметр дроту сітки 60 мкм). Об'єкт обробки може переміщуватися під гарматою зі швидкістю $v_{ном} = 0...20 \text{ см/с}$. Схеми обробки поверхонь об'єктів стрічковим електронним потоком представлені в роботах [8, 9].

Якість мікрообробки визначається станом технологічного середовища (залишковим тиском, температурою нагріву та охолодження виробів), досконалістю інструмента обробки – електронної гармати та електронного потоку, а також обладнанням і програмним продуктом, які забезпечують гнучкі та якісні режими мікрообробки. Поверхня матеріалу оплавляється електронним потоком на глибину до 200 мкм, а охолодження є кінцевою стадією формування модифікованого поверхневого шару.

Дослідження поверхні катоду, залишкового нанорельєфу поверхонь скла після електронно-променевої мікрообробки проводили за допомогою атомно-силового мікроскопу (АСМ) "NT-206" (виробник: ТДВ "Микротестмашины", Білорусь) за відповідними методиками з використанням кремнієвих зондів "Ultrasharp CSC12" (виробник: "Mikromasch", Німеччина) [10].

До складу приладу входять система мікропозиціонування і вбудований оптичний довгофокусу́ючий мікроскоп Logitech (виробник: "Logitech Inc", США), які дозволяють відновити положення зонду на поверхні зразка при повторному дослідженні з точністю $\pm 10 \text{ мкм}$.

Після впливу електронів, при відносній нерухомості гармати і об'єкта обробки, на поверхні матеріалів спостерігалися зони від термічного впливу у вигляді смуг, які досліджувалися за геометрією, кольором і слідами плавлення [11].

Експериментальна схема для визначення характеристик гармати наведена на рис.1.

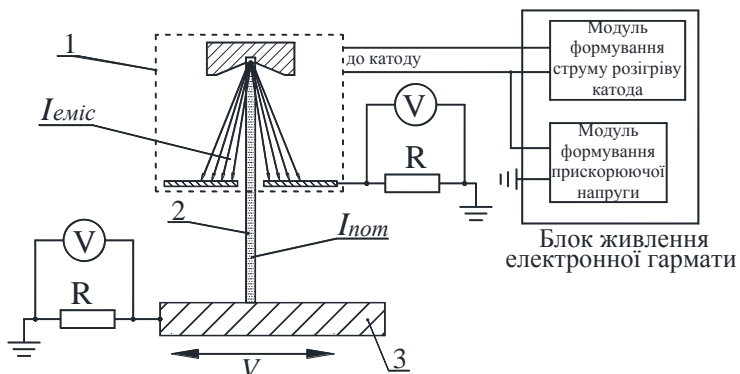


Рисунок 1 – Схема зондування електронного потоку стрічкової форми:
1 – електронна гармата Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – рухома платформа, $I_{ном}$ – струм електронного потоку; $I_{еміс}$ – струм емісії катоду

Результати експерименту та їх обговорення. Джерелом випромінювання електронів є дрітаний вольфрамовий катод діаметром 0,5 мм. До основних експлуатаційних параметрів катоду відноситься: струм емісії I_e , струм розжарення катоду I_k , термін служби t_k , точність юстування та ефективність катоду η .

Високі температури катоду ($T = 2100 \dots 2200^\circ\text{C}$) та періодичний контакт з атмосферою призводить до ерозії його поверхні (рис. 2.).

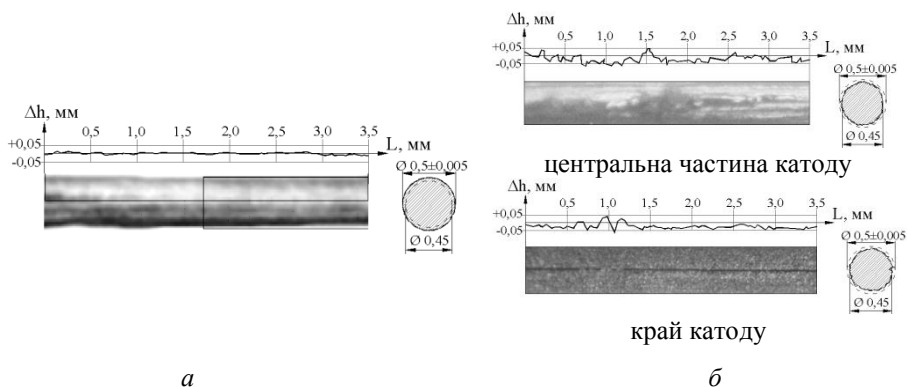


Рисунок 2 – Поверхня дрітаноного вольфрамового катоду (діаметр $D = 0,5$ мм; довжина робочої частини $L = 60$ мм; струм розігріву $I_f = 30$ А; тиск $p_0 = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Па) до експлуатації (а) та після експлуатації (б) протягом 90 годин (78 циклів відкачування), профілограма та зображення отримані АСМ "NT-206V".

В роботі визначено термін ефективної експлуатації дротяних вольфрамових катодів марки ВА-1 діаметром 0,1...0,6 мм в умовах технології електронно-променевої мікрообробки поверхневий шар оптичних матеріалів, який становить 40...120 годин, обумовлений фізичним станом поверхні катода і визначається робочою температурою, струмом емісії, діаметром дроту, електричними характеристиками навантаження катода та часом його контакту з повітрям при технологічній розгерметизації вакуумної камери.

Ефективною експлуатацією катоду визначено період, протягом якого його діаметр зменшується не більше ніж на 10% [12].

Зменшення діаметру катоду пов'язане, у першу чергу, з нерівномірним випаровуванням матеріалу у зв'язку з непостійністю температури вздовж дроту. Ефективність катоду визначено, як відношення струму емісії катоду до потужності, яку витрачено на його розігрів.

Характерні сліди термічної дії електронної стрічки на металевій сітці представлені на рис.3.

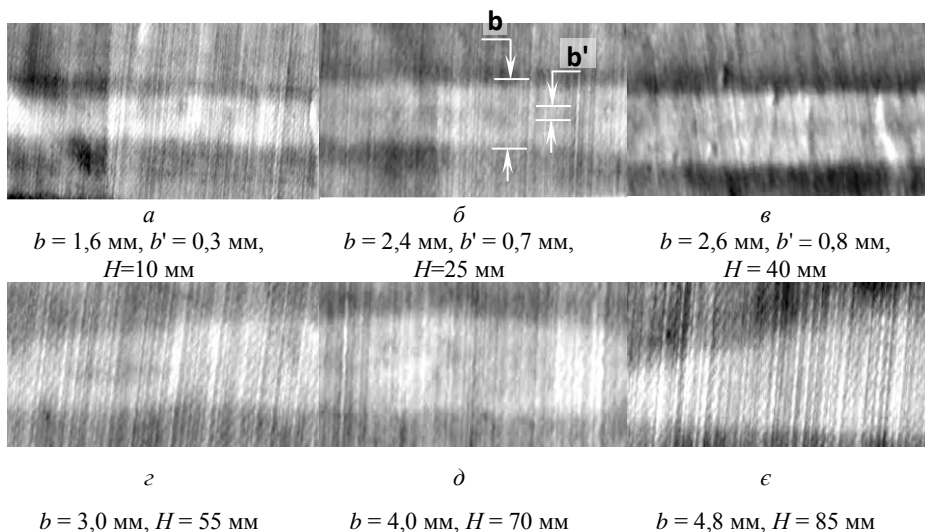


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд зони від термічного впливу на поверхні сітки зі сталі 12X18H10T на відстані H від об'єкту дії до електронно-променевої гармати.

На рис.3 більш світлі зони відповідають більшій інтенсивності дії електронного потоку. Відхилення ширини електронного потоку по довжині, відносно розміру його центральної частини, для відстаней $H = 10...40$ мм не перевищує 2...5%, що дозволяє класифікувати електронний потік на поверхні виробу як стрічку.

Темна смужка в середині зони дії електронного потоку b' пояснюється наявністю двох максимумів інтенсивності дії потоку електронів, що

характерно для використаної електронно-оптичної системи і підтверджено теоретичними розрахунками [13] та експериментально [14]. Зовнішній вигляд поверхні кремнієвих пластини після дії потоку електронів представлений на рис.4.

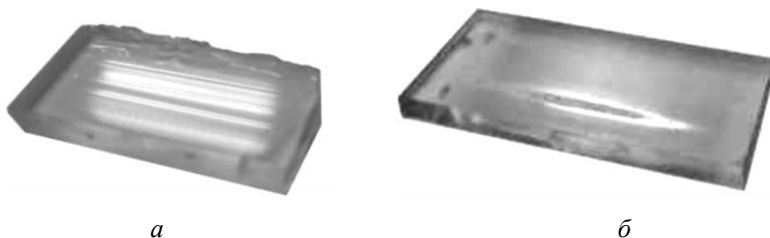
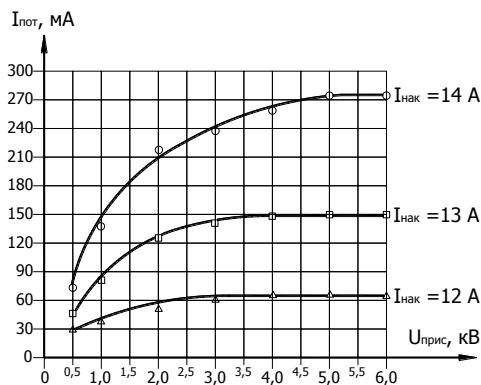


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд поверхні кремнієвої пластини після дії електронного потоку: сканування по поверхні сформованим потоком (а); слід від нерухомого потоку ($T_0 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_{np} = 4\text{--}5\text{ кВ}$, $I_{nom} = 100\text{ мА}$) (б).

Аналогічні результати з термічного впливу потоку отримані і на металевій (12Х18Н10Т) пластині показано на рисунку 5.



а



б

Рисунок 5 – Характерний вигляд зони від термічного впливу на поверхні пластини зі сталі 12Х18Н10Т (а) від дії електронного потоку (масштаб 10:1) та залежність струму електронного потоку I_{nom} від прискорюючої напруги $U_{прис}$ (б). Ширина щілини аноду $b_a = 2,0\text{ мм}$. Ширина електронного потоку $b = 2,4\text{ мм}$.

В ході проведених експериментальних досліджень визначені залежності ширини зони від термічного впливу b , центральної частини зони від термічного впливу b' і коефіцієнта зосередженості k_e від відстані до об'єкту (металева стрічка) дії $H_{обр}$, що наведені на рис.6.

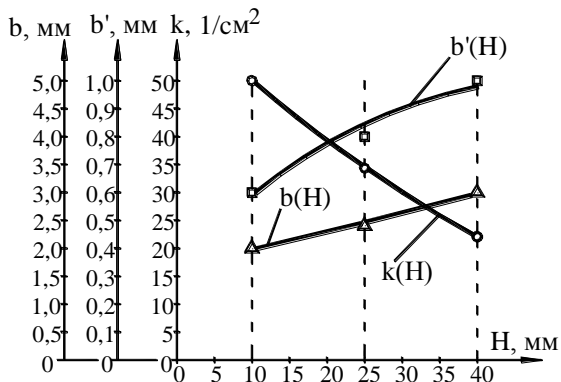


Рисунок 6 – Залежності ширини зони від термічного впливу b , центральної частини зони від термічного впливу b' і коефіцієнта зосередженості електронного потоку k_e від відстані до об'єкту дії ЕППГ $H_{обр}$.

Апроксимуючи експериментально отримані залежності ширини зони від термічного впливу і центральної частини зони від термічного впливу при відстані об'єкту обробки від електронно-променевої гармати $H_{обр}$ методом найменших квадратів отримали рівняння апроксимуючої кривої:

$$b(H_{обр}) = a_1 H_{обр} + a_2 H_{обр}^2, \quad b'(H_{обр}) = a_3 H_{обр} + a_4 H_{обр}^2.$$

Використовуючи залежність $b(H_{обр})$ і відому формулу $k_e = (2m^2)^{-1}$, де m – напівширина зони від термічного впливу ($m = \frac{1}{2} b$) отримали залежність коефіцієнта зосередженості електронного потоку k_e від відстані до об'єкту дії

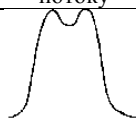

$$H_{обр}: k_e(H_{обр}) = a_1 H_{обр} + a_2 H_{обр}^2.$$

Результати, отримані за даною методикою добре узгоджуються з даними [15] для електронних пучків середніх енергій з круглою формою перерізу.

При переході електронного потоку з провідника на діелектрик, ширина стрічки змінюється, що підтверджується зондуванням потоку [16] та враховується при виборі режимів мікрообробки (таблиця.1).

Зміна ширини електронного потоку пов'язана з дією негативного поверхневого заряду, що накопичується на діелектричній поверхні.

Таблиця 1. Приклад зміни ширини та форми електронного потоку при переході з поверхні металевої пластини на поверхню скла

Умови впливу електронного потоку	Форма електронного потоку	Ширина електронного потоку b , мм	Максимальна густина струму $j_{\text{макс}}$, mA/cm^2
<u>На електропровідну поверхню</u> $H_{\text{обр}} = 20 \text{ мм}$, $U_{\text{пр}} = 3 \text{ кВ}$, $I_{\kappa} = 15 \text{ А}$, $I_{\text{ном}} = 45 \text{ мА}$		2	67
<u>На поверхню діелектрика</u> $H_{\text{обр}} = 20 \text{ мм}$, $U_{\text{пр}} = 3 \text{ кВ}$, $I_{\kappa} = 15 \text{ А}$, $I_{\text{ном}} = 45 \text{ мА}$, $T=800 \text{ К}$		3,5	41

Як можна побачити з прикладів, наведених в таблиці 1, за однакових умов впливу електронного потоку на матеріали з різною природою електричної провідності, електронний потік на діелектричних матеріалах має більшу у 1,5...2 рази ширину зони впливу.

Це пов'язано, з поверхневою поляризацією матеріалу діелектрика концентрованим потоком електронів, що, в свою чергу, приводить до утворення поблизу поверхні матеріалу електронної хмари, яка грає роль розфокусованої електронної лінзи.

Таке «уширення» зони впливу електронного потоку на матеріалі при незмінному значенні питомої потужності веде до пропорційного зменшення максимальної густини струму (порівняно з електропровідними матеріалами) в 1,4...1,65 разів.

Це дозволяє застосовувати керований електронний потік при більш точній та «лагідній» мікрообробці діелектричних елементів пристроїв для адитивного виробництва.

Висновки Запропонована методика формування та керування електронно-променевою мікрообробкою елементів пристроїв для адитивного виробництва, в основі якої лежить метод зондування електронного потоку стрічкової форми та наступне дослідження зон термічного впливу на електропровідній та діелектричній поверхнях.

Розроблена схема дослідження електронного потоку стрічкової форми дозволила визначити термін ефективної експлуатації дрітчастих вольфрамових катодів в умовах електронно-променевої мікрообробки, який становить 40...120 годин.

Ефективною експлуатацією катоду визначено період, протягом якого його діаметр зменшується не більше ніж на 10%.

Досліджені режими роботи електронно-променевої гармати Пірса в залежності від її енергетичних характеристик за допомогою зон термічного

впливу на електропровідні (на прикладі пластин зі сталі 12Х18Н10Т) та на діелектричні поверхні (на прикладі пластин із технічного кремнію) дозволили встановити залежність коефіцієнта зосередженості електронного потоку від відстані від анода гармати до оброблюваної поверхні.

Показана можливість керування процесом електронної мікрообробки шляхом дослідження впливу геометричних (ширини та форми) та енергетичних (прискорюючої напруги, струму потоку) характеристик електронного потоку на метрологічні показники обробки, а також показано розфокусуючу дію поверхневого заряду на діелектричних поверхнях.

Список використаних джерел: 1. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою / Ю.І.Коваленко, М.О.Бондаренко, І.В.Яценко, М.П.Рудь [та ін.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107. 2. Антонюк В.С. Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі / В.С.Антонюк, Ю.І.Коваленко, Ю.Ю.Бондаренко, М.О.Бондаренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – №1 (72) – С. 3-8. 3. Бондаренко М.О. Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів / М.О.Бондаренко // Труды Одесского политехнического университета: науч. и производ.-практ. сборник по техн. и естест. наукам. – Одеса, 2009. – Вып. 2(32). – С. 149-153. 4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев, А.Н.Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 5. Канашиевич Г.В. Спеціальні методи обробки оптичного скла / Г.В.Канашиевич, Д.І.Котельников, В.А.Вашенко; під ред. професора Д.І.Котельникова. – Чернігів: “Сіверська думка”, 2002. – 215 с. 6. Канашиевич Г.В. Электронная обработка оптических материалов / Г.В.Канашиевич, Д.И. Котельников // Электронная обработка материалов, 2002. – №2. – С.12-16. 7. Коваленко Ю.І. Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки поверхонь матеріалів / М.П.Рудь, М.О.Бондаренко, Ю.І.Коваленко, І.В.Яценко [та ін.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2 – С. 58-63. 8. Kovalenko Y.I. Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology / Y.I.Kovalenko, M.A.Bondarenko, E.V.Vertsanova, I.V.Iatsenko [etc.] // Physics and technology of thin films and nanosystems: XIV Intern. conf.: thesis, May, 20-25, 2013. - Ivano-Frankivsk, 2013. – pp. 92. 9. Рудь М.П. Моделирование низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / М.П.Рудь, Г.В.Канашиевич, М.О.Бондаренко, Ю.І.Коваленко // Наукові праці: науково-методичний журнал. – Вип. 179, Т.191. Комп'ютерні технології. – Миколаїв: В-во ЧДУ ім.Петра Могили, 2012. – С.28-31. 10. Білокінь С.О. Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі атомно-силового мікроскопа / С.О.Білокінь, М.О.Бондаренко, Ю.Ю.Бондаренко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки: наук. збір. – Чернігів: Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – №2 (78). – С. 176-181. 11. Бондаренко М.О. Оптимізація параметрів стрічкового електронного потоку за допомогою зон термічного впливу / М.О.Бондаренко, В.А.Вашенко, Г.В.Канашиевич // Тези доповідей першої Міжнародної НТК “Машинобудування та металообробка – 2003”. – Кіровоград, 17-19 квітня 2003. – С.15-16. 12. Бондаренко М.О. Методика розрахунку дрютяного вольфрамового катоду електронної гармати Пірса / М.О.Бондаренко, Г.В.Канашиевич, В.П.Бойко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2008. – №1. – С.113-116. 13. I. Yatsenko, V. Antonyuk, M. Bondarenko and V. Vashchenko, “Influence of Parameters by Electronic Ray on Properties of Superficial Layers of Optical Elements of Exact Instrument-making”, Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Innovations in Discrete Productions”. 1, 13 – 15 (2015). 14. Rud M.P. The express-diagnostics of band electronic stream / M.P.Rud, V.P.Boyko, Yu.I.Kovalenko, [etc.] //

Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2005. – №3. – С.49-51. 15. Кацман Ю.А. Электронные лампы высоких и низких частот / Ю.А.Кацман. – М.: Высшая школа, 1968. – 375 с. 16. Рудь М.П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / Рудь М.П. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – Спецвипуск – С.148-150.

Bibliography (transliterated): 1. Kovalenko Ju.I. Modifikacija nanorel'efu na optichnomu skli elektronno-promenevoju mikroobrobkoju / Ju.I.Kovalenko, M.O.Bondarenko, I.V.Jacenko, M.P.Rud' □ta in.□ // Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Cherkasi: ChDTU, 2012. – №1 – S. 104-107. 2. Antonjuk V.S. Pidvishennja mikrotverdosti ta znosostijkosti poverhon' elementiv virobiv z optichnogo skla mikroobrobkoju elektronnim potokom u vakuumi / V.S.Antonjuk, Ju.I.Kovalenko, Ju.Ju.Bondarenko, M.O.Bondarenko // Visnik Zhitomir's'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Zhitomir: ZhDTU, 2015. – №1 (72) – S. 3-8. 3. Bondarenko M.O. Doslidzhennja vplivu niz'koenergetichnogo elektronnoho potoku na mikrogeometriju poverhon' p'ezokeramichnih elementiv / M.O.Bondarenko // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta: nauch. i proizvod.-prakt. sbornik po tehn. i estest. naukam. – Odessa, 2009. – Vyp. 2(32). – S. 149-153. 4. Lazernaja i jelektronno-luchevaja obrabotka materialov: Spravochnik / N.N.Rykalin, A.A.Uglov, I.V.Zuev, A.N.Kokora. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 496 s. 5. Kanashevich G.V. Special'ni metodi obrobki optichnogo skla / G.V.Kanashevich, D.I.Kotel'nikov, V.A.Vashhenko; pid red. profesora D.I.Kotel'nikova. – Chernigiv: “Sivers'ka dumka”, 2002. – 215 s. 6. Kanashevich G.V. Jelektronnaja obrabotka opticheskikh materialov / G.V.Kanashevich, D.I. Kotel'nikov // Jelektronnaja obrabotka materialov, 2002. – №2. – S.12-16. 7. Kovalenko Ju.I. Doslidzhennja ta formuvannja strichkovogo elektronnoho potoku dlja mikroobrobki poverhon' materialiv / M.P.Rud', M.O.Bondarenko, Ju.I.Kovalenko, I.V.Jacenko □ta in.□ // Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. – Zaporizhzhja: ZNTU, 2012. – №2 – S. 58-63. 8. Kovalenko Y.I. Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology / Y.I.Kovalenko, M.A.Bondarenko, E.V.Vertsanova, I.V.Iatsenko □etc.□ // Physics and technology of thin films and nanosystems: HIV Intern. conf.: thesis, May, 20-25, 2013. - Ivano-Frankivsk, 2013. – pp. 92. 9. Rud' M.P. Modeljuvannja niz'koenergetichnoi strichkovoї elektronnoi garmati Pirsu metodom kincevih elementiv / M.P.Rud', G.V.Kanashevich, M.O.Bondarenko, Ju.I.Kovalenko // Naukovі praci: naukovo-metodichnij zhurnal. – Vip. 179, T.191. Komp'juterni tehnologii. – Mikolaiv: V-vo ChDU im.Petra Mogili, 2012. – S.28-31. 10. Bilokin' S.O. Doslidzhennja fizichnih harakteristik dielektrichnih poverhon' za dopomogoju diagnostichnogo stenda na bazi atomno-silovogo mikroskopa / S.O.Bilokin', M.O.Bondarenko, Ju.Ju.Bondarenko // Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki: nauk. zbir. – Chernigiv: Chernig. nac. tehnol. un-t, 2015. – №2 (78). – S. 176-181. 11. Bondarenko M.O. Optimizacija parametriv strichkovogo elektronnoho potoku za dopomogoju zon termichnogo vplivu / M.O.Bondarenko, V.A.Vashhenko, G.V.Kanashevich // Tezi dopovidej pershoї Mizhnarodnoї NTK “Mashinobuduvannja ta metaloobrobka – 2003”. – Kirovograd, 17-19 kvitnja 2003. – S.15-16. 12. Bondarenko M.O. Metodika rozrahunku drotnanogo vol'framovogo katodu elektronnoi garmati Pirsu / M.O.Bondarenko, G.V.Kanashevich, V.P.Bojko // Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Cherkasi: ChDTU, 2008. – №1. – S.113-116. 13. I. Yatsenko, V. Antonyuk, M. Bondarenko and V. Vashchenko, “Influence of Parameters by Electronic Ray on Properties of Superficial Layers of Optical Elements of Exact Instrument-making”, Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Innovations in Discrete Productions”. 1, 13 – 15 (2015). 14. Rud M.P. The express–diagnostics of band electronic stream / M.P.Rud, V.P.Boyko, Yu.I.Kovalenko, □etc.] // Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Cherkasi: ChDTU, 2005. – №3. – S.49-51. 15. Kacman Ju.A. Jelektronnje lampy visokih i nizkih chastot / Ju.A.Kacman. – M.: Vysshaja shkola, 1968. – 375 s. 16. Rud' M.P. Vznachennja rozpodilu gustini strumu strichkovogo elektronnoho potoku / Rud' M.P. // Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Cherkasi: ChDTU, 2007. – Specvипusк – S.148-150.